

ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 681.3:621.375

ФОРМУВАННЯ НЕРОЗРИВНИХ ПЕРЕДАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦАП І АЦП НА ОСНОВІ ВАГОВОЇ НАДЛИШКОВОСТІ

О.Д. Азаров, О.О. Решетнік, С.М. Захарченко, О.О. Лукашук, О.М. Харьков

Вступ

Переважає більшість сучасних перетворювачів форми інформації (ПФІ) реалізується з використанням класичної двійкової системи числення [1-5]. Водночас у ряді випадків використання ПФІ з ваговою надлишковістю на базі НПСЧ дозволяє комплексно вирішувати проблеми побудови швидкодіючих високоточних АЦП на низькоточній елементній базі [1]. Слід зауважити, що вагова надлишковість традиційно використовується в паралельних АЦП (одиничний код) для досягнення максимальної швидкодії. Проте такий підхід важко реалізувати через значне збільшення кількості обладнання [2]. При цьому число одиничних розрядів для n -розрядного двійкового коду становить 2^n .

Умовою правильного функціонування АЦП і ЦАП є нерозривність передатної характеристики, що забезпечує мінімізацію статичних похибок. У багаторозрядних АЦП для досягнення нерозривності передатної характеристики використовують різні форми введення надлишковості: структурна і інформаційна. Структурна надлишковість – це введення різного роду додаткових вузлів для коригування та калібрування. Інформаційна надлишковість пов'язана з отриманням додаткової інформації в процесі перетворення. Прикладами такого підходу можуть бути осереднення результатів багаторазового вимірювання та сігма-дельта модуляція. Інформаційно-вагова або вагова надлишковість проявляється в багатозначності зображення чисел та в тому, що сума ваг молодших розрядів більша ваги наступного розряду. Використання вагової надлишковості дає можливість комплексно вирішувати проблему збільшення точності АЦП побудованого на неточних елементах шляхом самокалібрування та підвищення швидкодії за рахунок компенсації динамічних похибок першого і другого роду [2, 6].

Принциповим недоліком використання двійкової системи числення в ПФІ є те, що наявність інструментальних похибок призводить до появи в передатній характеристиці ЦАП зон в яких вихідну аналогову велечину не можна набрати жодною кодовою комбінацією. Такі зони називаються розривами передатної характеристики [1, 2, 5, 7, 8]. Це в свою чергу, призводить до виникнення в АЦП, побудованому на такому ЦАП, так званих пропусків кодів [9]. Для побудови АЦП без пропусків коду треба використовувати ЦАП, який не має розривів передатної характеристики. Існують різні шляхи формування нерозривної передатної характеристики ЦАП. Так, зокрема, технологічні методи базуються на покращенні показників елементної бази, за рахунок використання нових матеріалів та технологій [2]. Широко застосовується лазерне припасування еталонів ЦАП, штучне старіння та ін. Також застосовуються різні схемотехнічні застосовуються різні підходи для стабілізації параметрів ЦАП або АЦП при змінненні умов оточуючого середовища та в часі. Застосування вищезгаданих методів призводить до збільшення собівартості готових виробів і в кінцевому підсумку все одно не забезпечує необхідних параметрів при підвищенні кількості розрядів ЦАП і АЦП. Принципово іншим підходом є використання вагової надлишковості.

Актуальність

Уведення вагової надлишковості в ЦАП і АЦП дозволяє формувати нерозривну передатну характеристику за умови наявності не тільки статичних похибок, а і динамічних похибок, які виникають під час перетворення. Такий підхід дає можливість зменшити вплив статичних похибок шляхом самокоригування або самокалібрування, а також можливість підвищення швидкодії процесу аналогоцифрового перетворення. Слід відзначити, що наведений підхід є досить ефективним для підвищення точності АЦП і ЦАП.

Побудова ЦАП на основі НПСЧ вимагає створення спеціальної елементної бази. І незважаючи на можливість використання при реалізації аналогових вузлів таких АЦП і ЦАП спрощеної дешевої технології, масове виробництво останніх ускладнено через вказану обставину. Водночас формування вагової надлишковості може бути реалізовано не тільки на основі відомих НПСЧ [9], а й з

використанням традиційних двійкових ЦАП. Вказаний підхід є новим і недостатньо дослідженим. Тому розробка підходів, щодо формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості з використанням поширених малорозрядних двійкових ЦАП є актуальною.

Мета

Метою статті є систематизація методів формування нерозривної передатної характеристики ПФІ на основі вагової надлишковості як із природним, так і штучним розташуванням ваг розрядів.

Постановка задач

Згідно із зазначеною метою формуються такі задачі:

- 1) Аналіз традиційних методів формування нерозривної передатної характеристики ПФІ шляхом уведення структурної надлишковості.
- 2) Формування нерозривної передатної характеристики ЦАП шляхом використання вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) із природним і штучним розташуванням ваг розрядів.
- 3) Аналіз можливостей реалізації ЦАП і АЦП з ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП.

Розв'язування задач

Розриви передатної характеристики можуть з'явитися в АЦП у складі якого є ЦАП з відхиленням ваг, навіть якщо ці відхилення мінімальні (до часток відсотків). Крім статичних інструментальних похибок, причиною розривів можуть бути динамічні похибки, коли тривалість такту під час порозрядного врівноваження є недостатньою для завершення перехідних процесів. Динамічні похибки у свою чергу можуть породжувати відхилення до десятків відсотків [9, 10]. Незважаючи на різну природу виникнення похибок обидві ситуації роблять АЦП непридатними до використання, оскільки виникають розриви передатної характеристики. Водночас спроба зменшити динамічні похибки збільшенням тривалості такту врівноваження призведе до значного зменшення швидкодії.

Для побудови АЦП без пропусків кодів треба використовувати ЦАП, який не має розривів передатної характеристики [1]. Для досягнення цієї мети широко застосовуються різноманітні технологічні та схемотехнічні методи [2]. Іншим підходом для формування нерозривної передатної характеристики ЦАП є використання структурної та інформаційно-вагової надлишковості (Рис. 1). До перших відносяться: паралельно-послідовне декодування, компенсація відхилень ваг розрядів, перекриття шкал розрядних сіток [2]. Методи компенсації відхилень ваг розрядів в свою чергу можна розділити на методи з використанням цифроаналогової пам'яті для кожного розряду [2] та методи загальної цифро-аналогової корекції [8]. До вагової надлишковості відносяться методи на основі: одиничного коду, тетрадних кодів, надлишкових позиційних систем числення.

При паралельно-послідовному декодуванні використовується незалежне збудження перетворювачів код-аналог для кожної групи коду, що перетворюється [2]. Перекриття розрядних сіток досягається за рахунок використання двох і більше ЦАП. На стику їх шкал формуються зони перекриття. Водночас ці два згаданих методи не усувають розривів у середині шкали окремого ЦАП.

Метод компенсації відхилень ваг розрядів передбачає два режими: визначення відхилень та робочий. Можливі два варіанти компенсації відхилень. Перший – використання для кожного неточного розряду основного ЦАП свого компенсуючого ЦАП [2]. Другий – використання одного додаткового точного ЦАП, на вхід якого надходить сума кодів відхилень ваг розрядів, що включені в основному ЦАП. Недоліком даного методу є використання великої кількості обладнання та наявності розривів усередині основного та допоміжних ЦАП.

Для звичайної двійкової системи числення характерним є те, що будь-якому числу відповідає єдина кодова комбінація нулів і одиниць. Системи з ваговою надлишковістю мають можливість зображати одне і те саме число декількома кодовими комбінаціями, що характеризує наявність так званої багатозначності зображення чисел.

Надлишкові позиційні системи числення (НПСЧ) поділяються на НПСЧ з дробовими та цілочисловими вагами розрядів. Для двійкової системи числення основа $\alpha = 2$, а для надлишкових систем числення $1 \leq \alpha < 2$. До НПСЧ з дробовими вагами розрядів зокрема відносяться так звані системи числення золотої p та s -пропорції.

НПСЧ мають вагову надлишковість. При цьому сума ваг молодших розрядів більша або у крайньому випадку дорівнює вазі старшого розряду:

$$\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j \geq Q_i,$$

де Q_j - вага j -го розряду, Q_i - вага i -го розряду.

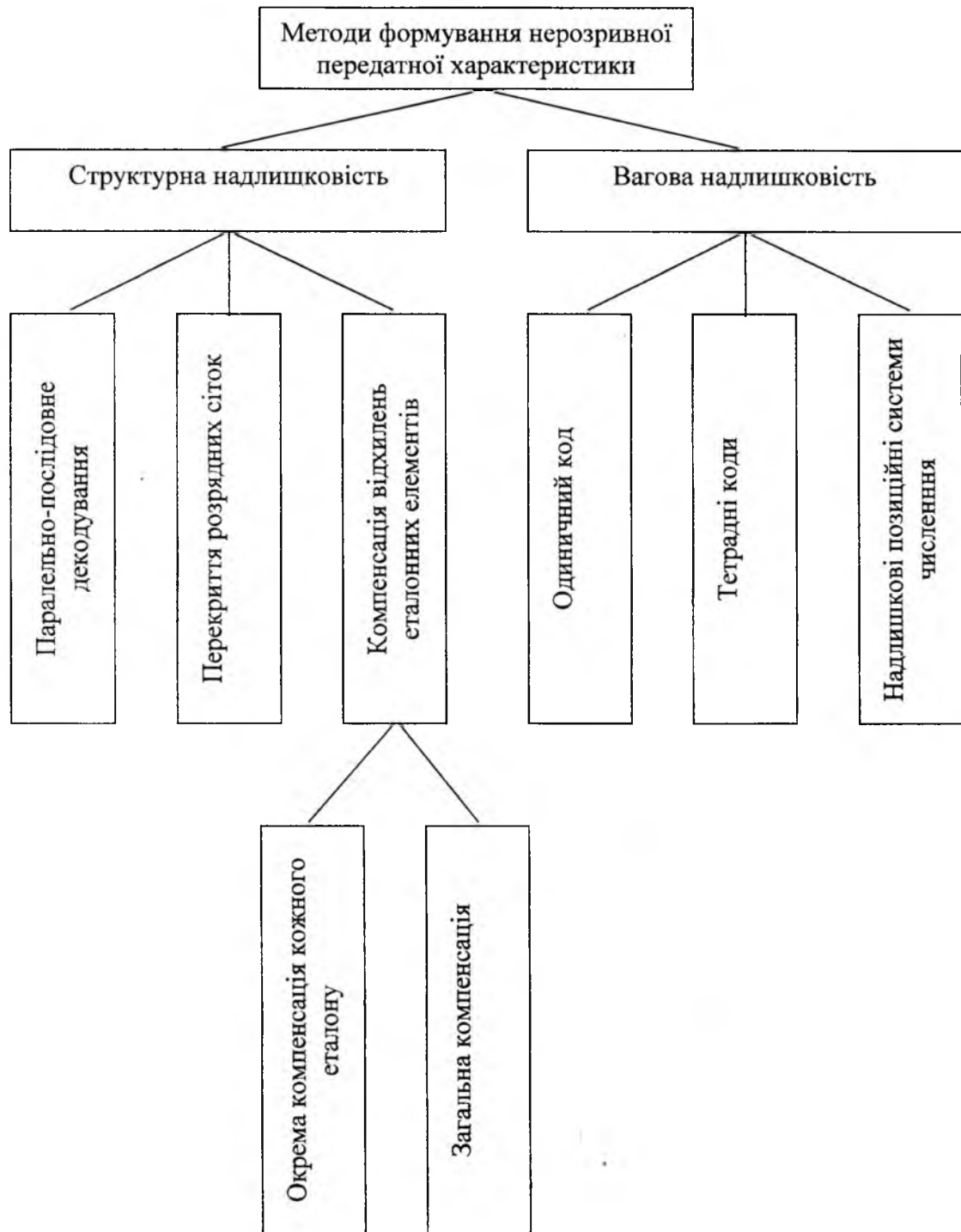


Рисунок 1 - Методи формування нерозривної передатної характеристики

Абсолютна вагова надлишковість визначається як:

$$\Delta Q_i = \sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i.$$

Для зручності часто користуються ще й відносною ваговою надлишковістю у вигляді:

$$\delta Q_i = \frac{\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{j=0}^{j=i} Q_j}.$$

За умови постійності α справедливе таке співвідношення:

$$\delta Q_i \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha}.$$

Рівень вагової надлишковості НПСЧ залежить від значення її основи α . У табл. 1 наведено значення відносною ваговою надлишковості для різних α .

У НПСЧ порівняно з двійковою системою числення подовжується розрядна сітка [9]. Ступінь подовження визначається коефіцієнтом подовження розрядної сітки:

$$\gamma_n = \frac{\ln 2}{\ln \alpha}.$$

Таблиця 1

α	2,00	1,90	1,80	1,70	1,618	1,60	1,50	1,40
δQ (%)	0	5,26	11,11	17,65	23,61	25,00	33,33	42,86

У табл. 2 наведено коефіцієнти для окремих α . При виборі основи НПСЧ керуються ваговою надлишковістю та коефіцієнтом подовження розрядної сітки.

Таблиця 2

α	1,20	1,30	1,414	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00
γ_n	3,80	2,64	2,00	1,71	1,48	1,31	1,18	1,08	1,00

Недоліком даного методу є необхідність створення особливої елементної бази для кожної окремої НПСЧ. Водночас, незважаючи на можливість використання при цьому спрощеної технології виготовлення аналогових вузлів у переважній більшості випадків багаторозрядні АЦП використовують двійкову систему числення. Треба відзначити, що порядок розташування ваг розрядів у НПСЧ може бути як природнім, так і штучним. При природньому розташуванні ваг розрядів вага кожного i -го розряду визначається, або як степінь основи системи числення, зокрема $Q_i \equiv \alpha^i$, або за рекурентним співвідношенням, наприклад для p -чисел Фібоначі $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$. При штучному розташуванні вага кожного i -го розряду також залежить від позиції, ачислове значення ваги для поточного i -го розряду може визначатися за одними правилами, а для сусіднього за іншими.

Автори пропонують кілька підходів щодо побудови надлишкових числових рядів на базі ненадлишкових двійкових рядів, зокрема зі штучним розташуванням ваг розрядів. Останнє дає можливість побудови надлишкових ЦАП і АЦП з покращеними статичними і динамічними характеристиками на базі традиційних двійкових ЦАП та не вимагає створення оригінальної елементної бази.

Перший ряд формується простим повторенням ваг розрядів звичайного двійкового ряду (ряд із дублюванням) у вигляді: 1; 1; 2; 2; 4; 4; ... 2^{n-1} ; 2^{n-1} . Перший ряд має штучне розташування ваг

розрядів. ЦАП на основі такого ряду будується на основі двох однакових двійкових ЦАП. Ідеальна передатна характеристика ЦАП має вигляд прямої. На рис. 2 зображено передатну характеристику ЦАП на основі першого ряду за умови наявності похибок у двох старших розрядах. З аналізу рисунку видно, що завдяки наявності вагової надлишковості ЦАП має неперервну передатну характеристику. Перевагою ряду із дублюванням є простота реалізації ПФІ на його основі. Недоліками ряду є: великий коефіцієнт подовження ряду та непостійність співвідношення між сусідніми членами, що значно ускладнює мікроелектронну реалізацію ЦАП на базі такої НПСЧ. Надлишкові розряди вставляються у двійковий ряд за допомогою так званого «методу гребінки», тобто надлишкові і звичайні розряди ідуть один за одним (Рис. 3).

Другий ряд формується множенням ваг розрядів звичайного двійкового ряду на постійний множник 1,5 і вставкою в інший двійковий ряд у вигляді: 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; ... 2^{n-1} ; $1,5 * 2^{n-1}$. Другий ряд має штучне розташування ваг розрядів. Використання другого ряду вимагає двох однакових двійкових ЦАП. Другий ЦАП лише повинен давати на виході аналогову величину більшу (або меншу) в півтора рази ніж на виході першого ЦАП. Цього можна досягти збільшивши опорну напругу ЦАП або використавши масштабний блок з відповідним коефіцієнтом передачі. Варто зазначити, що обираючи різні коефіцієнти можна будувати ряди з різною відносною надлишковістю. Перевагою даного ряду є збільшення динамічного діапазону ЦАП. Недоліками такого ряду також є: великий коефіцієнт подовження ряду [9] та непостійність співвідношення між сусідніми членами.

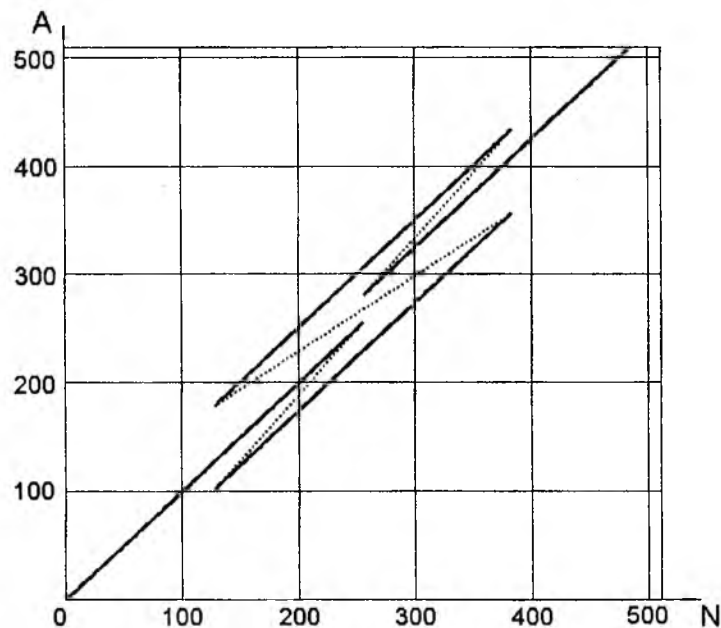


Рисунок 2 - Передатна характеристика ЦАП з відхиленням ваг двох розрядів

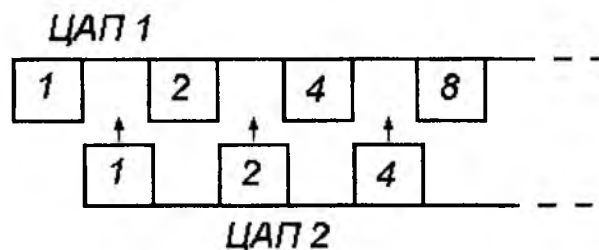


Рисунок 3 - Розташування розрядів надлишкового ЦАП за методом гребінки

Третій ряд подібний до другого, а саме, він формується із множником $\sqrt{2} \approx 1.41$. Таким чином отримуємо ряд НПСЧ із природнім розташуванням ваг розрядів $\alpha = \sqrt{2}$: 1; $\sqrt{2}$; 2; $2\sqrt{2}$; 4; $4\sqrt{2}$; ... 2^{n-1} ; $2^{n-1}\sqrt{2}$. Третій ряд відрізняється від інших постійністю співвідношення між сусідніми членами ряду, що полегшує мікроелектронну реалізацію ЦАП на основі такого ряду. Водночас ЦАП на основі

даного ряду будується на основі двох однакових двійкових ненадлишкових ЦАП. Ряд отримано на основі такого рівняння:

$$\frac{x^{i+1}}{2^i} = \frac{2^{i+1}}{x^{i+1}},$$

де x - шукане значення основи системи числення.

Розв'яжемо це рівняння. Перепишемо його таким чином:

$$x^{2i+2} = 2^{2i+1}$$

Скоротивши отримуємо остаточний вигляд рівняння:

$$x^2 = 2.$$

Отримали два корені $x = \sqrt{2}$ та $x = -\sqrt{2}$. Для побудови ряду можна використовувати лише дійсний додатний корінь.

Перевагою даного ряду є регулярність співвідношення між сусідніми членами.

Четвертий формується також формується з двох двійкових рядів. Члени другого ряду вставляються так як показано на рис. 4. При цьому отримуємо послідовність у вигляді: 1; 2; 3; 4; 8; 12; ... 2^{n-2} ; 2^{n-1} ; $2^{n-2} + 2^{n-1}$. Четвертий ряд має більший динамічний діапазон та менший коефіцієнт подовження ряду, але співвідношення між сусідніми членами нерегулярне.

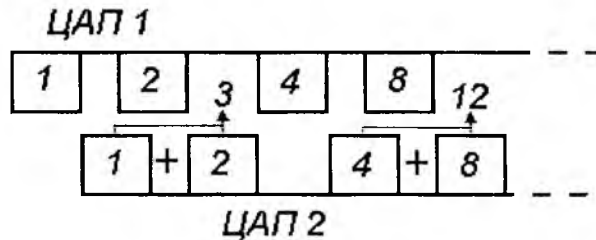


Рисунок 4 - Розташування розрядів надлишкового ЦАП на базі четвертого ряду

Таким чином отримали чотири ряди:

- 1; 1; 2; 2; 4; 4; ... 2^{n-1} ; 2^{n-1} ;
- 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; ... 2^{n-1} ; $1.5 * 2^{n-1}$;
- 1; $\sqrt{2}$; 2; $2\sqrt{2}$; 4; $4\sqrt{2}$; ... 2^{n-1} ; $2^{n-1}\sqrt{2}$;
- 1; 2; 3; 4; 8; 12; ... 2^{n-2} ; 2^{n-1} ; $2^{n-2} + 2^{n-1}$.

Оскільки вказані числові ряди є надлишковими, то для остаточного прийняття рішення про вибір якогось з них треба оцінити їх ефективність. Значення ефективності можна оцінити через питому вагову надлишковість, яка враховує збільшення кількості обладнання, тобто відношення рівня вагової надлишковості до коефіцієнту подовження розрядної сітки:

$$\rho = \frac{\delta Q}{\gamma_n}$$

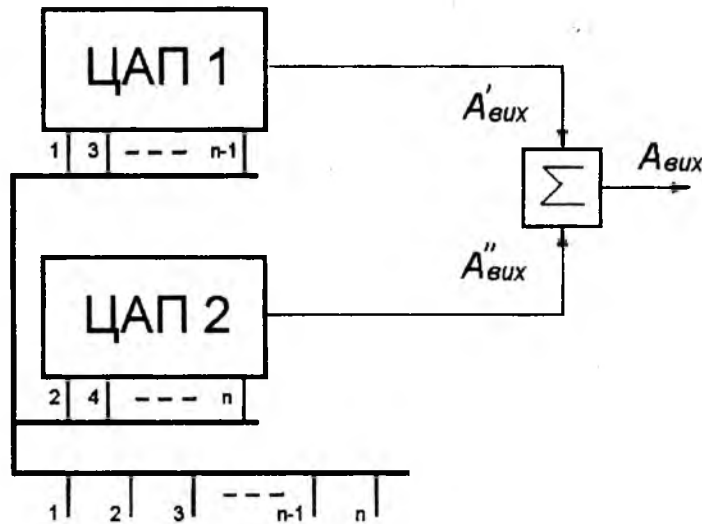
Це значення визначає ефективність використання додаткового обладнання для досягнення потрібного рівня вагової надлишковості (табл. 3). У таблиці наведено рівень вагової надлишковості для найгіршого випадку (відношення між двома останніми членами ряду найбільше), коефіцієнт подовження ряду та відносну вагову надлишковість. За цим критерієм третій ряд виглядає найкращим. До того ж він виграє за рахунок сталості співвідношення між сусідніми членами ряду. Оскільки нерегулярність відношень ваг розрядів призводить до певних складнощів використання таких рядів у техніці перетворення інформації [9]. Так, структура ЦАП на основі такого ряду, а, відповідно, й АЦП, буде нерегулярною, що незручно для мікроелектронної реалізації.

Технічна реалізація ЦАП на основі запропонованих рядів є досить простою. ЦАП на основі першого ряду будується із двох однакових ЦАП, виходи яких під'єднано до суматора аналогових сигналів (рис. 5 а). Слід зазначити, що у випадку застосування струмових ЦАП, виходи об'єднуються

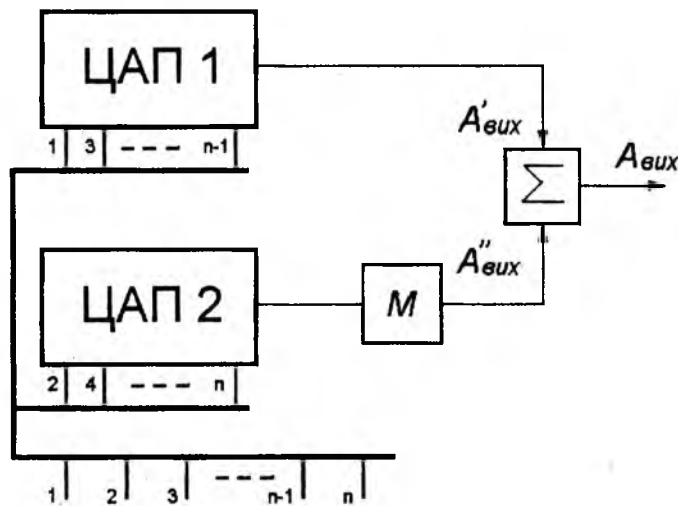
гальванічно. ЦАП на основі другого або третього ряду будується теж із двох однакових ЦАП (рис. 5 б), але вихід другого ЦАП під'єднується до загального виходу через масштабний блок із коефіцієнтом передачі M .

Таблиця 3

Ряди	I	II	III	IV	V $\alpha = 1.618$	VI $\alpha = 1.5$
δQ	0,33	0,398	0,412	0,199	0,236	0,333
γ	2,00	2,00	2,00	2,00	1,441	1,71
ρ	0,165	0,199	0,206	0,099	0,164	0,195



а)



б)

Рисунок 5 – Узагальнена структура ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП з використанням: а) першого ряду; б) другого або третього ряду

Для другого ряду $M = 1.5$, а для третього $M = \sqrt{2}$. При розрахунку похибки такого ЦАП необхідно враховувати похибку масштабного блоку. ЦАП на основі четвертого ряду реалізувати досить просто. Його реалізація не вимагає наявності масштабного блоку. Виводи другого ЦАП з'єднуються попарно і комутуються із загальними виводами ЦАП.

Висновки

1. Запропоновано новий підхід для визначення вагової надлишковості, який дозволяє в комплексі систематизувати не тільки ряди, що формуються в рамках НПСЧ, як з природнім, так і штучним порядком розташування ваг розрядів, зокрема із використанням двійкових рядів, що дозволяє використовувати традиційну елементну базу.

2. Показано, що побудова ЦАП із ваговою надлишковістю на основі двійкових рядів дає за допомогою запропонованих підходів також надає можливість підвищення швидкодії та точності ПФІ, побудованих на неточних елементах.

3. Показано, що оптимальним за критерієм мінімальної додаткової кількості обладнання є використання надлишкового ряду з постійним відношенням ваг розрядів, зокрема, із значенням основи системи числення $\alpha = \sqrt{2}$.

Список літератури

1. Азаров О.Д., Архипчук О.А., Захарченко С.М. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 125 с.
2. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации. / Под ред. В.Б. Смолова. – Л.: Энергия, 1976. – 336с.: ил.
3. А. С. №1231609 АЦП Стахов А.П., Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Конючевский О.В. 1986.
4. А. С. №1221750 АЦП Стахов А.П., Моисеев В.И., Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Васильева Т.Н. 1985.
5. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи / Под ред. В.Б. Смолова и Е.А. Смирнова. – Л.: Энергия, 1967. – 312с.: ил.
6. Азаров О.Д., Коваленко О.О. Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів: Монографія. / Під заг. ред. О.Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006 – 147 с.
7. Галелюка И. Как виртуальная плата ADIsimADC™ моделирует поведение преобразователей данных // ЭКис. – 2006 - №6 С. 8 – 11.
8. Грушвицкий Р. И. и др. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем.– Л.: Энергоатомиздат, 1989.– 160 с.: ил.
9. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.
10. Островерхов В. В. Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 176 с.: ил.

Азаров Олексій Дмитрович – д.т.н., професор, директор інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 58-02-25, e-mail: azarov@livi.vstu.vinnica.ua

Решетнік Олександр Олександрович – студент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. +380979693316, e-mail: de_gratnik@gambler.ru

Захарченко Сергій Михайлович – к.т.н., доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

Лукашук Олександр Олександрович – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 96, Вінниця, 21021.

Харьков Олександр Миколайович – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 96, Вінниця, 21021.